

La evolución de la precipitación en la altiplanicie cundiboyacense: ¿tendencia o ciclos?

The Evolution of Precipitation in the Altiplano Cundiboyacense: Trend or Cycles?

YULIA IVANOVA*

WILLIAM RODRIGO MARÍN RAMÍREZ**

RESUMEN

La escasez de agua y las inundaciones fuertes de los últimos años en la zona de la altiplanicie cundiboyacense implican la necesidad de estudiar con mayor profundidad el comportamiento de la precipitación anual con el propósito de proponer soluciones a estas problemáticas hidroclimáticas. En este estudio se trata de dar respuesta a dos preguntas que son: ¿se está presentando un cambio en los valores totales anuales de precipitación? ¿El cambio de la precipitación en la zona de estudio obedece a ciclos? Según este estudio, en el 85,7 % de los casos, el signo de las fases de ciclos concordó con la evolución de los valores promedios de precipitación, lo que abre la posibilidad de estimar a largo plazo el comportamiento de la precipitación total anual en la zona de estudio, utilizando el concepto de ciclicidad.

Palabras clave: precipitación, tendencia, ciclo, Colombia, altiplano cundiboyacense.

ABSTRACT

Water scarcity and severe flooding in the Altiplano Cundiboyacense (Cundiboyacense High Plateau) area during recent years, imply the need for a more in-depth study of the behavior of annual precipitation in order to propose solutions to these hydro-climatic issues. This study attempts to answer the following two questions: are the total annual precipitation values changing? And, is the precipitation change in the studied area cyclic? According to this study, in 85.7 % of cases the sign of the cycle phases matched the evolution of the average values of precipitation, which opens the possibility of estimating the long-term behavior of the total annual precipitation in the area under study, by using the concept of cyclicity.

Keywords: Precipitation, Tendency, Cycle, Colombia, Cundiboyacense High Plateau.

FECHA DE RECEPCIÓN: 7 DE ENERO DEL 2012 • FECHA DE APROBACIÓN: 23 DE MARZO DEL 2012

* Ingeniera hidróloga, MsC en Gestión Ambiental. Docente del Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Central, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: ivanova.yulia.a@gmail.com.

** Agrólogo. Especialista en Hidrología. Docente del Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Central, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: rmarinr@ucentral.edu.co.

Introducción

En las últimas décadas ha cambiado la percepción sobre la estabilidad del sistema climático a causa de las actividades antrópicas que contribuyen al efecto del cambio climático. En la Modernidad, la población demanda mayores consumos de los bienes y servicios ambientales tanto debido al crecimiento poblacional como por los patrones de consumo más exigentes (PNUMA, 2005). La mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero son productos de las actividades humanas; las emisiones de dichos gases en la atmósfera están generando calentamiento global y como consecuencia se ha generado un cambio en el comportamiento de las principales variables climatológicas, por ejemplo en la temperatura y la precipitación que confirman unos recientes estudios del clima en América Latina (Grimm, 2010). En la conferencia de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que fue celebrada en Ginebra (Suiza) del 31 al 4 de septiembre del 2009, se reunieron los proveedores y usuarios de las predicciones climáticas con objeto de favorecer la adaptación al clima y de estudiar con mayor precisión los riesgos, relacionados con condiciones meteorológicas mediante la incorporación de información y predicciones climáticas, con base científica, en políticas o prácticas aplicables a todos los ámbitos (OMM, 2009). La información confiable sobre las condiciones meteorológicas según los registros históricos podrá servir como una base importante para los métodos de predicción de todos los eventos meteorológicos, incluyendo los eventos extremos como sequías e inundaciones que afectan la vida humana y la vida equilibrada del medio ambiente.

Colombia no está ajena a esta crisis. El Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (MAVDT) en su estudio sobre la adaptación de Colombia al cambio climático dicen que el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) confirma el registro de un decrecimiento en la precipitación mensual entre 2 y 3 mm por década entre 1961 y 1990 (MAVDT, 2009). Se considera importante estudiar las tendencias actuales en la precipitación, aplicando las series históricas más recientes de esa variable climatológica teniendo en cuenta dos aspectos importantes. El primer aspecto consiste en el desarrollo significativo de la humanidad, en los noventa se requería un ascenso en la explotación de los recursos naturales y se caracterizaba por el mayor consumo energético, en comparación con los años anteriores, tanto en el crecimiento demográfico como por los crecientes patrones de consumo de los bienes y servicios ambientales (PNUMA, 2005). El segundo está relacionado con un crecimiento en la intensidad de los

fenómenos de La Niña y de El Niño que se reflexionan en el territorio nacional en las sequías o las inundaciones prolongadas (Poveda, 1996; Carvajal, Jiménez y Materón, 1998). Según el departamento de pronóstico del Ideam, las sequías en el territorio de Colombia en el 2009 se pueden comparar por su intensidad con las de 1997. Los sectores hidroeléctrico y agrícola están altamente influenciados en la zona cundiboyacense por la alta variabilidad climática. Así, según los registros hidrológicos, entre agosto y septiembre del 2009, el aporte de agua de ríos a las represas fue del 45 % menos que la media histórica. Entre los municipios más afectados por el fenómeno cálido del Pacífico se aprecian los departamentos de Cundinamarca y Boyacá (Ideam, 2009). El 2010 se destacó por sus inundaciones, como el fenómeno adverso de las sequías. De esta manera, la variabilidad climatológica y, como consecuencia, la variabilidad hidrológica azotan los sectores económicos del país que quedan desprotegidos ante los eventos naturales. Identificando los regímenes de las precipitaciones en el territorio nacional y sus posibles cambios tendenciales, se podrían tomar las medidas de prevención para el manejo óptimo de recurso hídrico y evitar posibles repercusiones sobre las vidas humanas y el desarrollo de sus actividades.

Metodología

La metodología aplicada se puede reflejar en los siguientes componentes:

- Revisión de la densidad de las estaciones
- Revisión de homogeneidad de las series de las precipitaciones
- Revisión de las tendencias
- Construcción de los ciclos de las precipitaciones
- Comparación del signo de las tendencias con el signo del ciclo

Revisión de la densidad de las estaciones

En el estudio se analizó la densidad de la red de las estaciones, ya que la información de estas es primordial en los estudios climatológicos. El objetivo de la red de las estaciones de precipitación es dar información confiable sobre condiciones de precipitación, con el objetivo de evaluar la oferta del recurso hídrico para la demanda de la población, la conservación de la biodiversidad, la evaluación de la variabilidad espacio-temporal del recurso hídrico, entre otros. Para contar con la

información confiable se necesita disponer la red de estaciones que corresponda a los criterios de representatividad de la información que se obtiene para la región (Domínguez, 2006).

En el análisis estadístico de las variables climatológicas hay unos elementos que pueden influir en la calidad de los resultados, entre cuales se puede apreciar la cantidad adecuada de las estaciones, la calidad de los registros, asociada tanto al tiempo suficiente del monitoreo para hacer los estudios climatológicos, como a la ausencia de los registros faltantes y erróneos. A pesar de tener un gran número de las estaciones registradoras de lluvia en la zona del estudio, el problema de la calidad de los registros lleva al problema de la cantidad de las estaciones que podrían utilizarse en el estudio. En la zona del estudio se seleccionaron las estaciones que poseen su periodo de registro a partir de 1960-1966 hasta la fecha. A continuación se presenta el mapa de las estaciones con las se contó en el trabajo (figura 1).



Figura 1. Mapa de las estaciones en la zona del estudio

Fuente: elaboración propia.

Como se ve del plano anterior y en la tabla 1, en el estudio se analizaron los datos de las veintinueve estaciones cuyos registros son suficientemente largos para poder realizar los estudios climáticos (cerca de los treinta años). Uno de los elementos importantes a la hora de analizar el comportamiento de las variables climatológicas

se relaciona con la densidad de las estaciones. Según las recomendaciones de la OMM la distancia horizontal entre las dos estaciones de observación no puede superar los 2,5 grados o 278 km en la zona del cinturón ecuatorial (OMM, 2010). Como se puede observar en la figura 1, la densidad de la distribución de las estaciones en unas zonas no corresponde a este criterio, ya que las distancias horizontales entre estas superan los 278 km. Esa insuficiencia en la red de las estaciones podrá influir a la generalización de los resultados a nivel espacial. En la tabla 1 se presentan los datos generales de las estaciones consultadas en el estudio.

Tabla 1. Estaciones de precipitación en la zona del estudio

No.	ESTACIÓN	CÓDIGO	PERIODO DE REGISTRO	COORDENADAS		COTA, MSNM
				x	y	
1	Venta Larga	2120026	1960-2006	5,067	-74,050	3062
2	Pradera	2120044	1960-2006	5,000	-74,133	2703
3	Guaraní El Peñón	2120060	1960-2006	4,433	-74,300	2800
4	San José	2120080	1961-2006	4,983	-73,900	2700
5	Salitre	2120088	1960-2006	5,183	-74,000	3140
6	Encanto	2120138	1960-2006	5,167	-73,883	3150
7	Fute	2120166	1960-2006	4,600	-74,283	2607
8	San Jorge	2120572	1960-2006	4,517	-74,200	2890
9	Ramada	2120516	1960-2006	4,717	-74,183	2545
10	Represa Neusa	2120541	1960-2006	5,150	-73,983	3100
11	La Iberia	2120548	1956-2006	5,033	-73,717	2760
12	Primavera	2120557	1963-2006	4,850	-74,217	2590
13	Represa Sisga	2120569	1960-2006	5,083	-73,733	2675
14	Sta. Rita	2312012	1961-2006	5,600	-73,917	2800
15	Arrayanes	2402031	1961-2006	5,583	-73,717	2575
16	Socotá	2401037	1963-2006	5,400	-73,917	3080
17	Esclusa Merchán	2401043	1962-2006	5,700	-73,750	2550
18	Boyera	2401511	1960-2006	5,300	-73,850	2610
19	Carrizal	2401515	1960-2006	5,200	-73,767	2860
20	Sutatausa	2401521	1962-2006	5,250	-73,850	2700
21	San Miguel de Sema	2401531	1961-2006	5,517	-73,717	2600
22	Isla Santuario	2401512	1960-2006	5,467	-73,733	2580

Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar de la tabla 1, en promedio, la mayoría de las estaciones poseen el periodo de registro de 46 años que son suficientes para determinar los parámetros estadísticos de la serie de datos.

Revisión de homogeneidad de los registros

En principio, los valores ausentes de la precipitación fueron complementados por la correlación múltiple con los datos de las estaciones cercanas donde el valor del coeficiente de correlación múltiple tuviera el valor $r \geq 0,7$. Antes de poder aplicar las herramientas estadísticas se necesita demostrar que los registros sean homogéneos (estar formados por el mismo conjunto de los factores formadores de las precipitaciones). Hay varias causas que introducen la heterogeneidad a la serie de precipitación y estas son importantes de descifrar para el estudio de las tendencias. Entre ellos se pueden apreciar el cambio de la localización de la estación, el cambio del equipo de las mediciones a lo largo de la existencia de la estación, cambios del clima, entre otros.

Para analizar la homogeneidad de las series anuales de las precipitaciones en la zona del estudio fueron aplicados los criterios paramétricos de Student y Fisher. El primer criterio sirve para analizar la homogeneidad de la serie por el valor promedio y el segundo analiza la serie temporal según su homogeneidad por la varianza (Drushinin, 2001). En los dos casos la serie temporal de datos se divide en dos partes y, posteriormente, se comparan estadísticamente sus valores promedios y las varianzas. El criterio de Student se describe en la forma:

$$t = \frac{\bar{y} - \bar{x}}{\sqrt{n_x \sigma_x^2 + n_y \sigma_y^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}} \quad (1)$$

- n_x : longitud de la primera serie.
- n_y : longitud de la segunda serie.
- \bar{x} : promedio de la primera serie.
- \bar{y} : promedio de la segunda serie.
- σ_x : desviación estándar de la primera serie.
- σ_y : desviación estándar de la segunda serie.

Esta estadística se somete a la distribución de Student con grado de libertad $k = n_x + n_y$. Cuando revisan la hipótesis nula $\bar{x} = \bar{y}$ con el criterio de Student determinan el área crítica con nivel de significación $q\%$ como el área de las desviaciones máximas absolutas $|t| \geq |t_q|$. El valor de t se determina de las tablas estadísticas. Los grados de libertad se pueden calcular como cantidad de los datos en la serie temporal menos dos.

El criterio de Fischer revisa la homogeneidad de la serie por desviación estándar. Este se describe en la siguiente forma:

$$F = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2} \quad (2)$$

Donde:

σ_x : Desviación estándar de la primera serie

σ_y : Desviación estándar de la segunda serie

El criterio de Fischer depende de los grados de libertad $k_1 = n_1 - 1$, $k_2 = n_2 - 1$. Para determinar los valores críticos de Fischer se usan las tablas estadísticas de la distribución Fischer. La aplicación de test de homogeneidad en la mayoría de las estaciones ha mostrado la aleatoriedad de su formación, utilizando los niveles de significancia $2\alpha = 5\%$ y $2\alpha = 1\%$. La excepción fue la estación Venta Larga, donde independientemente del nivel de significancia, la hipótesis de homogeneidad fue refutada. En este caso, la estación Venta Larga fue excluida y en el estudio se contó con las veintiuna estaciones. La demostración de la homogeneidad de los registros históricos permite su posterior análisis estadístico de los datos.

Revisión de las tendencias: utilizando las series anuales complementadas de precipitación de las estaciones seleccionadas se construyeron las tendencias lineales de esas, donde se pueden hacer las siguientes conclusiones. La tendencia lineal no presenta un patrón en la zona del estudio, lo que quiere decir que en unas zonas se observa la tendencia creciente en la precipitación y en las otras, la tendencia decreciente. En la tabla 2 se muestra el resumen de este análisis.

Tabla 2. Resumen de tendencias en la zona del estudio

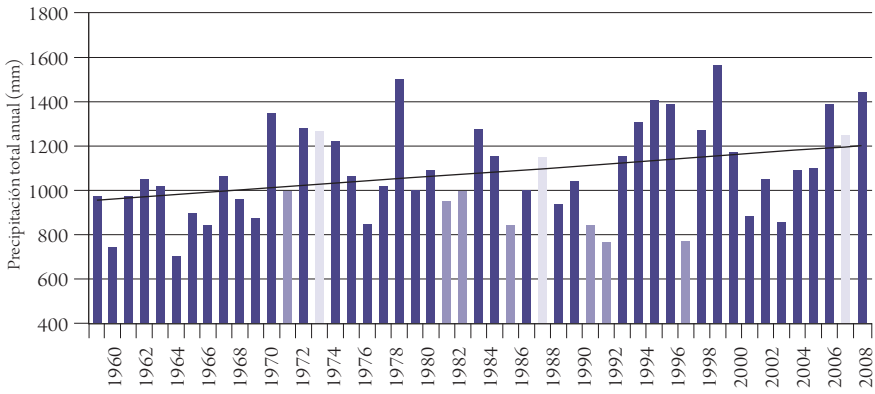
No.	ESTACIÓN	CÓDIGO	TENDENCIA (MM/AÑO)	No.	ESTACIÓN	CÓDIGO	TENDENCIA (MM/AÑO)
1	Pradera	2120044	- 5,21	12	Represa Sisga	2120569	+ 5,65
2	Guaraní El Peñón	2120060	+ 0,65	13	Sta. Rita	2312012	- 2,22
3	San José	2120080	+ 1,55	14	Arrayanes	2402031	- 10,23
4	Salitre	2120088	+ 0,20	15	Socotá	2401037	- 0,93
5	Encanto	2120138	+ 1,20	16	Esclusa Merchán	2401043	0,00
6	Fute	2120166	- 0,87	17	Boyera	2401511	+ 0,44
7	San Jorge	2120572	- 1,85	18	Carrizal	2401515	- 1,63
8	Ramada	2120516	+ 0,98	19	Sutatausa	2401521	- 1,59
9	Represa Neusa	2120541	- 7,17	20	San Miguel de Sema	2401531	- 7,67
10	La Iberia	2120548	- 0,87	21	Isla Santuario	2401512	+5,21
11	Primavera	2120557	- 2,30				

De la tabla 2 y de la figura 2 se aprecia que las estaciones en la zona del estudio no disponen de un patrón único de las tendencias. A pesar de la cercanía geográfica, unas estaciones poseen las tendencias positivas y otras —las negativas—, lo que se podría explicar posiblemente por la influencia de la compleja orografía del sector, cambios en la vegetación y en el uso del suelo. El 38 % de las estaciones analizadas tienden a tener la tendencia creciente de la precipitación y el 57 % de las estaciones se pueden caracterizar por la tendencia decreciente. Aplicando el test de la representatividad, esta se confirma en el intervalo de confianza del 95 %.

La distribución espacial de las tendencias de las precipitaciones en la zona del estudio se presenta en la figura 3. Como conclusión general del análisis del mapa se puede decir, que la variabilidad de las tendencias pone a duda la posibilidad de la generalización de las tendencias en la zona del estudio a causa de que en la misma zona se pueden presentar tanto las tendencias crecientes de la precipitación como las decrecientes y sus magnitudes son distintas.

De esa manera, los métodos de predicción del recurso hídrico resultan ser bastante complejos e imprecisos en la región, analizando las tendencias a nivel espacial. En este caso, se recomendaría, para las entidades interesadas en los pronósticos de la precipitación a largo plazo, contar con la información confiable de las estaciones más cercanas al sitio de interés, con el propósito de diagnosticar con la mayor pre-

ISLA SANTUARIO (2401512)



ESTACIÓN ARRAYANES (2401031)

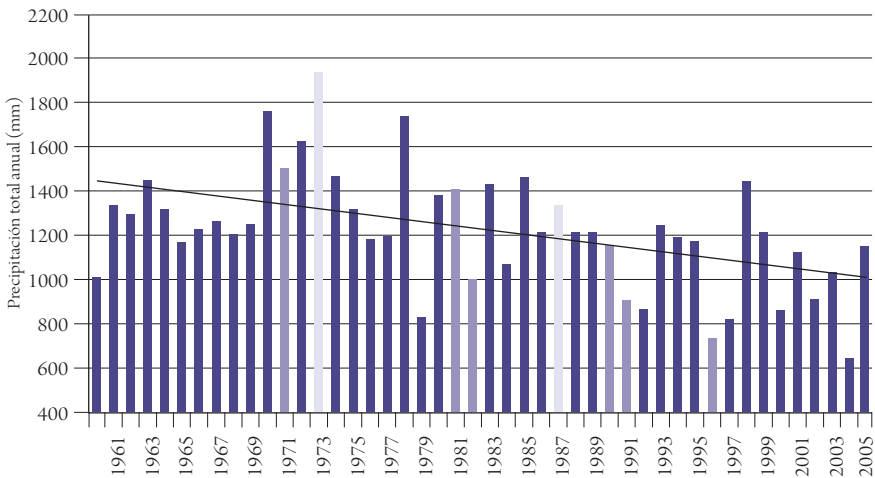


Figura 2. Tendencias lineales contrarias de la precipitación en la zona del estudio

Fuente: elaboración propia.

cisión posible el régimen de esa variable meteorológica. Se quiere apreciar, que las tendencias lineales dependen de los eventos extremos meteorológicos que se han presentado a lo largo del periodo de observación, los cuales, de alguna manera, conducen la tendencia hacia el aumento o al contrario de la precipitación. Por ejemplo, el fenómeno de El Niño se refleja en la zona del estudio en la escasez de la precipitación. Los periodos más fuertes de la aparición del fenómeno de El Niño son los años 1991-1992 y 1997 (MAVDT, 2002) que se han recordado como los años extremadamente secos en la región considerada. El fenómeno frío del océano

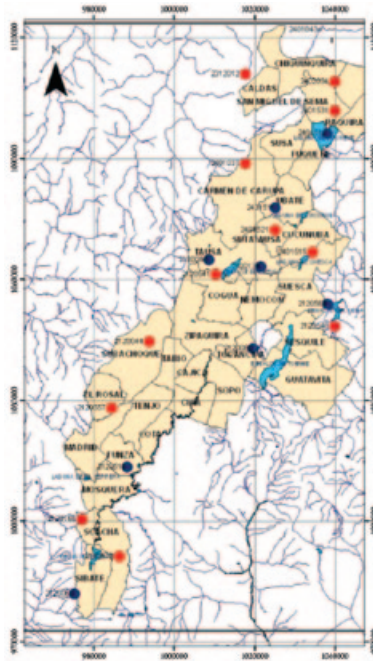


Figura 3. Tendencias de la precipitación en la zona del estudio

Nota: círculos rojos representan una disminución de las precipitaciones y los círculos azules (tendencias crecientes de los valores de la precipitación total anual).

Fuente: elaboración propia.

Pacífico (el fenómeno de La Niña) se refleja en la zona del estudio en los periodos húmedos (Pabón, 2007). El penúltimo fenómeno de La Niña de una duración significativa se presentó en 1990. Teniendo en cuenta las fechas relacionadas de los dos fenómenos climatológicos, se hizo la prueba de diferenciarlos en la gráfica de la variación anual de la precipitación de las estaciones consideradas para explicar los picos máximos y mínimos que se ven en las figuras anteriores. En la figura anterior, las columnas rojas corresponden a los periodos de la aparición del evento de El Niño de mayores intensidades que se caracterizó en todos los casos en una disminución de la precipitación, mientras que las columnas amarillas en la misma figura reflejan la aparición del fenómeno de La Niña que influye a un aumento de las precipitaciones totales anuales en la zona del estudio.

De igual manera, en las variaciones de la precipitación anual se presentan frecuentemente unos picos máximos o mínimos significativos que no se pueden explicar fácilmente, ya que no responden a los años de los fenómenos extremos de La Niña

y de El Niño. Además, las gráficas de las tendencias lineales no explican la naturaleza de las tendencias que se observan actualmente. ¿Por cuál razón la precipitación en la zona se disminuye o se aumenta?, ¿será la ciclicidad natural que lleva la precipitación hacia la disminución y el aumento?

Para analizar el cambio en las tendencias a lo largo de los años y aclarar la incertidumbre en estas, las series históricas fueron divididas en las tres partes iguales, correspondientes a los periodos 1960-1975, 1976-1991, 1992-2006. Para determinar los valores promedios por las series de cortas duraciones se necesita demostrar que el error del cálculo de esas no supera el 10 o 15 % (Rozdestvenkiy, 1974). En la tabla 3 se presentan los valores de los errores de los valores promedios, calculados dependiendo de la longitud de registro por la ecuación 3 (Morales V, Pedro. 2007).

$$\sigma_{pprom} = \frac{c_v}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Donde:

- σ_{pprom} : error de definición del valor promedio de la serie de datos.
- C_v : coeficiente de variación de la variable considerada (precipitación total anual).
- n : longitud de la serie de datos (años).

Como se puede ver en la ecuación, el valor del error del cálculo de promedio está directamente relacionado con el coeficiente de variación y la longitud de registro. Contando en los cálculos con los registros de longitudes significativos, el valor del error será menor que cuando se tiene en cuenta una longitud menor de la serie. Además de este parámetro, en la ecuación se tiene en cuenta la variabilidad del proceso, reflejada en el coeficiente de variación que muestra la dispersión de los datos respecto a su promedio. El papel de este parámetro estadístico es muy importante ya que dice sobre la posibilidad de utilizar las series cortas en los cálculos estadísticos siempre cuando la vvariabilidad de esas no es significativa. Aplicando la ecuación 1 se construyó la tabla 3 con los valores de los errores de los valores promedios, utilizando todo el periodo de registro (46 años), 15 años y 10 años de registro para demostrar que en el caso del estudio el cálculo de los valores promedios por las series cortas no afectan la confiabilidad de estos.

Tabla 3. Valores del cálculo del primer momento estadístico

No.	ESTACIÓN	ERROR (%)			No.	ESTACIÓN	ERROR (%)		
		SERIE ANUAL	10 AÑOS	15 AÑOS			SERIE ANUAL	10 AÑOS	15 AÑOS
1	Pradera	3,80	7,78	6,00	12	Represa Sisga	2,47	4,70	3,70
2	Guaraní El Peñón	2,58	5,10	4,57	13	Sta. Rita	2,85	5,77	5,04
3	San José	4,86	7,25	6,51	14	Arrayanes	3,19	5,91	4,77
4	Salitre	2,97	6,60	5,36	15	Socotá	2,81	6,00	5,00
5	Encanto	3,17	6,86	5,50	16	Esclusa Merchán	2,82	5,75	5,14
6	Fute	3,25	5,85	4,94	17	Boyera	2,70	5,82	4,71
7	San Jorge	2,19	4,75	3,92	18	Carrizal	2,49	5,04	4,30
8	Ramada	2,35	5,19	4,09	19	Sutatausa	2,87	5,89	5,00
9	Represa Neusa	3,40	5,88	5,18	20	San Miguel de Sema	3,68	7,27	6,23
10	La Iberia	2,09	4,49	3,61	21	Isla Santuario	0,62	5,91	4,76
11	Primavera	2,57	5,27	4,40		Error promedio	2,8	5,9	4,9

Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla 3, el error medio del valor promedio de precipitación, calculado por la serie disponible, es de 2,8 %, que se puede considerar como bastante bajo ya que no supera el rango de los valores críticos, mencionados anteriormente. El valor del error del promedio, calculado para las series de 15 años, es de 4,9 % y está por debajo del límite crítico y tiene la diferencia con el valor del error de la serie larga de tan solo 3,1 %, que no se razona como significativo. De esa manera se puede concluir, que en caso del estudio, teniendo en cuenta la variabilidad baja de la precipitación a nivel anual, se considera pertinente calcular el primer momento estadístico de la precipitación con confianza, analizando las series de 15 años.

Los valores promedios de precipitación total anual, calculados por el periodo de 15 años, fueron relacionados con sus valores de precipitación total anual, estimados para todo el periodo histórico disponible, utilizando la ecuación 4. Esta comparación da un coeficiente dimensional que permite evaluar la manera porcentual en cuánto se había cambiado el valor de la precipitación total anual, teniendo en cuenta el signo de este cambio.

$$\Delta = \frac{(P_{\text{promperíodo}} - P_{\text{prommultianual}})}{P_{\text{prommultianual}}} \quad (4)$$

Gracias a este análisis, se pudo identificar el cambio porcentual de los valores promedios de las precipitaciones totales anuales en los periodos seleccionados, relacionándolos con el valor promedio de la precipitación total anual de todo el período de registro (tabla 4).

Tabla 4. Evolución de los valores promedios de precipitación

No.	ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN PROMEDIO TOTAL ANUAL (MM)			No.	ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN PROMEDIO TOTAL ANUAL (MM)		
		1960-1975	1976-1991	1992-2006			1960-1975	1976-1991	1992-2006
1	Pradera	7,38	6,32	-14,6	12	Represa Sisga	-0,10	0,002	0,10
2	Guaraní El Peñon	-0,81	-0,37	1,25	13	Sta. Rita	0,03	0,02	-0,05
3	San José	-0,01	-0,11	0,12	14	Arrayanes	0,13	0,03	-0,16
4	Salitre	0,02	-0,01	-0,01	15	Socotá	0,02	0,02	-0,04
5	Encanto	-0,001	-0,06	0,07	16	Esclusa Merchán	0,02	0,01	-0,03
6	Fute	-0,04	0,12	-0,08	17	Boyera	-0,02	0,03	-0,02
7	San Jorge	0,05	-0,01	-0,03	18	Carrizal	0,05	-0,01	-0,04
8	Ramada	-0,001	-0,01	0,01	19	Sutatausa	0,03	0,02	-0,05
9	Represa Neusa	0,10	0,09	-0,19	20	San Miguel de Sema	0,11	-0,02	-0,09
10	La Iberia	0,02	0,001	-0,02	21	Isla Santuario	-0,06	-0,03	0,06
11	Primavera	0,07	-0,01	-0,06					

Fuente: elaboración propia.

Con base en la tabla 4, para cada uno los periodos definidos (1960-1975, 1976-1991 y 1992-2006) se calcularon los porcentajes de las estaciones con los valores promedios superiores o inferiores al valor promedio multianual. Este análisis se refleja en la figura 4, que muestra la evolución de los valores promedios de la precipitación para los intervalos de tiempo considerados.

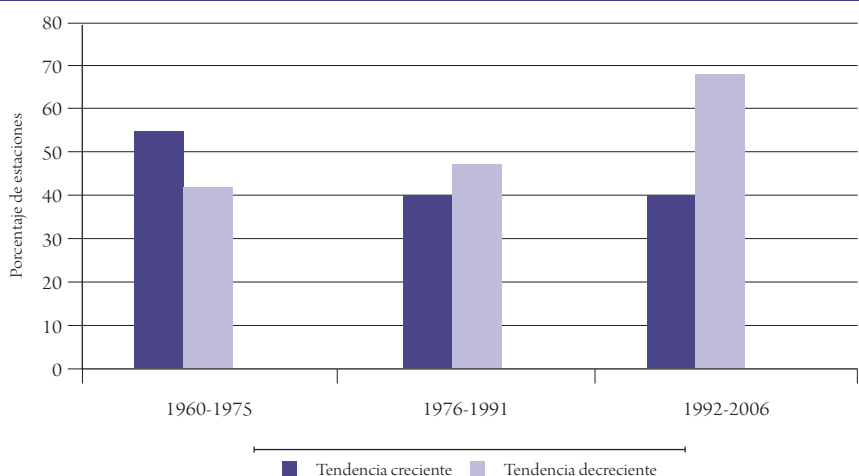


Figura 4. Evolución del porcentaje de las estaciones con las tendencias crecientes y decrecientes en la precipitación

Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar de la figura 4, en el primer periodo, correspondiente a los años de 1960-1975, la mayoría de las estaciones han tenido el valor de la precipitación total anual superior al valor promedio de la precipitación total anual, calculada teniendo en cuenta todo el periodo de registro (columna azul de los años 1960-1975). En el segundo periodo, correspondiente a los años 1976-1991, la proporción entre las estaciones cuyos valores de las precipitaciones son superiores (52,4 %) al valor promedio de la precipitación según todo el periodo de registro es muy similar a la cantidad de las estaciones cuyos valores son menores (47,6 %) del valor de la precipitación de todo el registro. Analizando los datos arrojados en el periodo 1992-2006, se puede ver, que las tendencias decrecientes (pirámide roja) son las principales en la zona de estudio que fue confirmado por los registros de 71,4 % de las estaciones. Con base en los resultados arrojados para el último periodo se construyó el mapa de las tendencias a nivel espacial que se muestra en la figura 5.

Comparando los mapas de las tendencias construidas y al tenerlas en cuenta por todo el periodo de registro, y de los últimos 15 años, se puede concluir que en el último periodo, la mayoría de las estaciones en la zona confirman un decrecimiento en los valores de las precipitaciones totales anuales. Las tendencias del aumento de la precipitación se encuentran en las cercanías a las lagunas de la región (Guatavita, Fúquene, Suesca, entre otros), donde los sistemas lénticos que posiblemente modifican el régimen de lluvias por sus influencias propias (por ejemplo, la misma

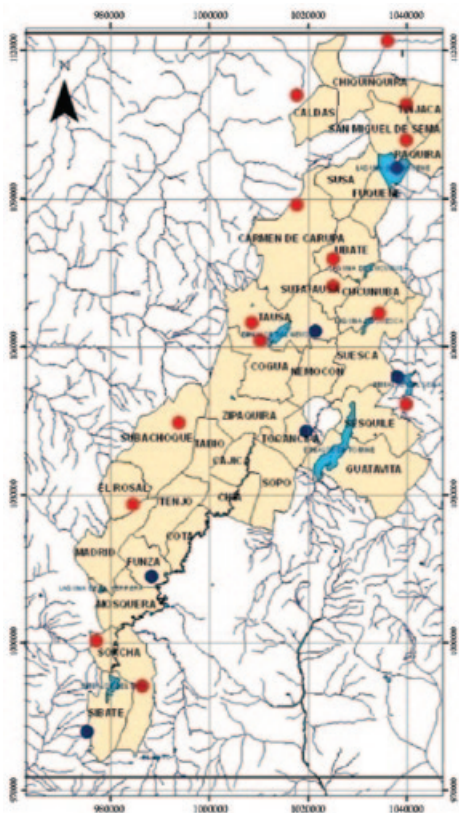


Figura 5. Mapa de las tendencias actuales en la precipitación (1992-2006)

Nota: el color rojo refleja la disminución de los valores promedio y el color azul el cambio contrario.

Fuente: elaboración propia.

superficie de agua, donde el coeficiente de rugosidad es bajo y sirve como acelerador de las velocidades de viento).

Construcción de los ciclos de las precipitaciones

El patrón de la disminución de los valores de las precipitaciones totales anuales, confirmado por la mayoría de las estaciones en la zona estudio, hace suponer que dichas tendencias están asociadas a los factores formadores globales del clima. La hipótesis de la variabilidad anual, de las precipitaciones, considera que las fluctuaciones pluviométricas regionales muestran una buena correspondencia con la actividad solar (Quereda, 1994). En el capítulo actual se pone a prueba esta teoría, aplicándola para la zona de interés. Para poder comparar la actividad solar con las

variaciones cíclicas de las precipitaciones, para cada una de estas variables fueron construidas las curvas de diferencias integrales, usadas para identificar los ciclos de larga duración en las series temporales de datos. Para el caso de la ciclicidad solar fueron usados los datos de los números de Wolf que es una característica de la actividad solar.

La construcción de los ciclos de las variables a comparar se realizó a través de la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_{prom}} - 1 \right)}{C_v} \quad (5)$$

Donde:

- k : coeficiente integral.
- P_i : valor de la variable en el año i .
- P_{prom} : valor promedio multianual de la variable.
- C_v : coeficiente de variación de la variable.

Aplicando la ecuación 5 a las series de precipitaciones, se obtienen las series en los coeficientes dimensionales que permiten su comparación a nivel espacial. Se puede apreciar que, en la mayoría de los casos, la fase del ciclo corresponde al mismo signo en la tendencia lineal. Las series construidas fueron comparadas con las del ciclo solar, representado por las constantes de Wolf. Una manera efectiva de comparar la representatividad de relación entre las series de dos variables es la aplicación del coeficiente de correlación. El valor del coeficiente de correlación igual o mayor de 0,7 dice sobre una buena concordancia de los datos. En la tabla 5 se muestra el resumen del análisis realizado y en la figura 6 se presenta la expresión gráfica de los ciclos solares y los de la precipitación total anual.

De los valores de los coeficientes de correlación se puede decidir que la relación entre la actividad solar y los ciclos de precipitación no está claramente definida o no es significativa en la región del estudio que podría refutar la hipótesis bajo la cual el comportamiento de las precipitaciones explícitamente está ligado a la actividad.

Posiblemente, este hecho se puede explicar por poca inercia del sistema atmosférico que está altamente influenciado por un conjunto de los factores tal como globales y locales, cada uno de los cuales tiene su peso diferente en la formación de régimen de las lluvias. En este caso no se puede hablar sobre la comprensión completa del comportamiento de precipitación solo por los factores globales sino por un complejo de los factores, donde descubrir el peso de cada uno de los factores representa un estudio adicional, que no está dentro de los objetivos actuales del trabajo. En el estudio se asume que la influencia de la actividad solar no está muy marcada claramente por el complejo de las características propias de la zona a las cuales pertenecen el factor orográfico, que se expresa en la exposición de las vertientes y la variedad de la orografía; los diversos tipos de las coberturas vegetales, que influyen al coeficiente de rugosidad de la superficie terrestre, interviniendo al comportamiento de lluvias en la región; la existencia de los grandes cuerpos de agua, etc.

Tabla 5. Valores del coeficiente de correlación entre los ciclos de actividad solar y la precipitación

N	ESTACIÓN	CÓDIGO	r	NO.	ESTACIÓN	CÓDIGO	r
1	Pradera	2120044	0,014	12	Represa Sisga	2120569	0,13
2	Guaraní El Peñón	2120060	0,122	13	Sta. Rita	2312012	0,17
3	San José	2120080	-0,34	14	Arrayanes	2402031	0,05
4	Salitre	2120088	0,17	15	Socotá	2401037	0,24
5	Encanto	2120138	-0,56	16	Esclusa Merchán	2401043	0,30
6	Fute	2120166	0,47	17	Boyera	2401511	0,13
7	San Jorge	2120572	-0,38	18	Carrizal	2401515	0,05
8	Ramada	2120516	0,09	19	Sutatausa	2401521	0,22
9	Represa Neusa	2120541	0,22	20	San Miguel de Sema	2401531	-0,06
10	La Iberia	2120548	-0,41	21	Isla Santuario	2401512	0,02
11	Primavera	2120557	-0,54				

r: coeficiente de correlación.

Fuente: elaboración propia.

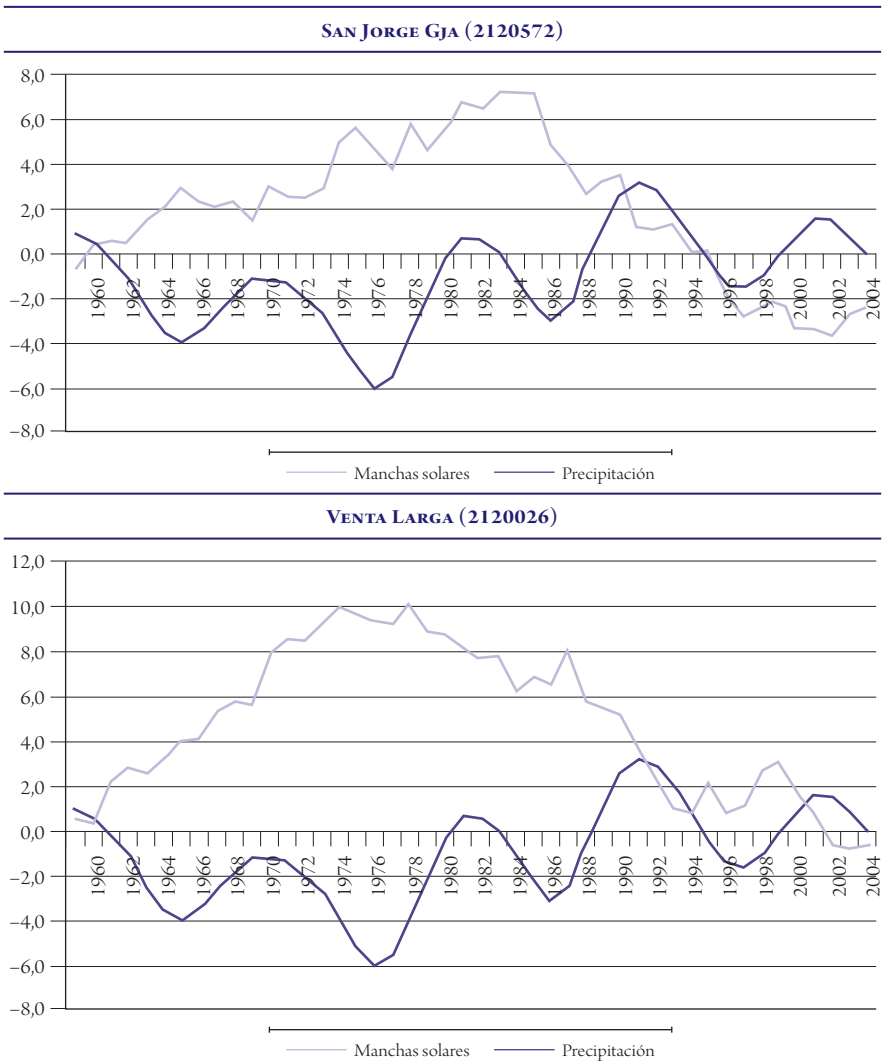


Figura 6. Comparación de los ciclos de precipitación y la actividad solar

Fuente: elaboración propia.

Para verificar si el descenso de las precipitaciones confirmado por la mayoría de las estaciones en la zona está asociado a las fases decrecientes del ciclo, se hizo la comparación de las fases del ciclo (fase creciente - signo “+” y fase decreciente - signo “-“ en la tabla 6) con las tendencias de los últimos 15 años de registro.

Tabla 6. Correspondencia de las tendencias lineales de precipitación a la fase del ciclo climatológico

ESTACIÓN	CÓDIGO	FASE CICLO	TENDENCIA 1992 -2006	ESTACIÓN	CÓDIGO	FASE CICLO	TENDENCIA 1992 -2006
Pradera	2120044	-	-	Represa del Sisga	2120569	+	+
Guaraní El Peñón	2120060	+	+	Sta. Rita	2312012	-	-
San José	2120080	+	+	Arrayanes	2402031	-	-
Salitre	2120088	-	-	Socotá	2401037	-	-
Encanto	2120138	+	+	Esclusa Merchán	2401043	-	-
Fute	2120166	-	-	Boyera	2401511	+	-
San Jorge	2120572	+	-	Carrizal	2401515	-	-
Ramada	2120516	+	+	Sutatausa	2401521	-	-
Represa Neusa	2120541	-	-	San Miguel de Sema	2401531	-	-
La Iberia	2120548	+	-	Isla Santuario	2401512	+	+
Primavera	2120557	-	-				
Fase creciente del ciclo “+”				Tendencia positiva de las precipitaciones “+”			
Fase decreciente del ciclo “-”				Tendencia negativa de las precipitaciones “-”			

Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en la tabla 6, en el 85,7 % de las estaciones el signo de la tendencia lineal de precipitación corresponde al mismo signo de fase del ciclo y en tan solo el 14,3 % de los casos esa correspondencia no se cumple. De lo anterior se puede hacer la conclusión sobre la posibilidad de estimar el cambio de la precipitación total anual en la zona respecto a su valor promedio, estudiando a más profundidad la formación de los ciclos de esa variable meteorológica. Como uno de los resultados del estudio, se puede concluir que en la mayor parte de los casos el signo de la tendencia lineal de las precipitaciones coincide con el de la fase de ciclo, demostrando que el decrecimiento de las precipitaciones observado en el altiplano cundiboyacense se explica por la variabilidad natural de esta variable climatológica.

No se descarta la influencia del fenómeno del cambio climático global al comportamiento de la precipitación total anual en la zona del estudio, pero este factor no se resalta todavía como uno de los dominantes en la zona del estudio.

Conclusiones

El análisis de las tendencias lineales, de la precipitación de los últimos 15 años, confirma que en el 71,4 % de las estaciones consideradas se observa la tendencia decreciente, mientras que el resto de las estaciones dicen sobre la tendencia creciente. Es importante destacar que las tendencias crecientes se registraron en las estaciones ubicadas cerca de los grandes cuerpos acuáticos de la zona como, por ejemplo, la laguna de Fúquene, la de Guatavita, la de Suesca, la de Muña, entre otras, donde el régimen de precipitación está altamente influenciado por esos sistemas acuáticos. De esta manera, se puede concluir sobre un descenso general de precipitación en la zona del estudio, comparado con su valor promedio total multianual, conjunto con alta sensibilidad frente a los fenómenos macro climáticos como La Niña y El Niño.

Con el propósito de revisar la correspondencia de las tendencias y las fases del ciclo de la precipitación, como la explicación de decrecimiento de la precipitación, se construyeron las curvas de diferencias finitas que representan la ciclicidad en el corte multianual. Resultó que el 85,7 % de los casos, el signo de las fases de ciclos concordó con el de las tendencias lineales que dice sobre la posibilidad de estimar a largo plazo el comportamiento de la precipitación total anual en la zona del estudio, utilizando el concepto de ciclicidad de esa variable meteorológica.

Los mecanismos de la formación de los ciclos en la altiplanicie cundiboyacense resultan ser bastante diversos por unos conjuntos de factores locales y complejos de cuantificar. Esta conclusión proviene del análisis correlativo entre la variabilidad de las manchas solares y los ciclos de la precipitación, que podría demostrar la dependencia del régimen de la precipitación de los factores globales, pero que no dio los resultados confirmativos y que presentaría un tema independiente de investigación. En la zona del estudio no se pudo definir un solo patrón en los ciclos de la precipitación total anual, que podría explicar las causas homogéneas en la formación del régimen de esa variable meteorológica.

Teniendo en cuenta lo expuesto, el estudio está en confirmar sobre un descenso actual de los valores totales anuales de la precipitación en la zona de la altiplanicie cundiboyacense. Este descenso, en la mayoría de los casos, coincide con la fase decreciente de los ciclos hidrológicos que llevan a la conclusión sobre la naturaleza del proceso que se está presentando y sobre la posibilidad de la estimación

de las magnitudes de la precipitación total anual, conociendo mejor las relaciones entre los factores-formadores de la lluvia (causa) y el fenómeno de la ocurrencia de la precipitación (efecto).

Referencias

- Carvajal, Y.; Jiménez, G. y Materón, H. (1998). *Incidencia del fenómeno ENSO en la hidroclimatología del valle del río Cauca, Colombia*. Recuperado de [http://www.ifeanet.org/publicaciones/boletines/27\(3\)/743.pdf](http://www.ifeanet.org/publicaciones/boletines/27(3)/743.pdf).
- Domínguez, C.; Efraín, A.; Niño, R. y Verdugo, N. (2006). Aplicación de los criterios de optimización de Karasiov a la red colombiana. *Avances en Recursos Hidráulicos* (13).
- Drushinin, V. S. y Sikan, A. V. (2001). *Métodos de tratamiento estadístico de la información hidrometeorológica*. San Petersburgo: Hidrometeoizdat.
- Grimm, A. (2010, 14 de julio). Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Science Journal*, 25 (4), 537-554.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam). *Atlas climatológico de Colombia*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/atlas/mclima.htm>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Ideam (2002, marzo). *Efectos naturales y socioeconómicos del Fenómeno El Niño en Colombia*. Bogotá.
- MAVDT (s.f). *Adaptación de Colombia ante el cambio climático*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/BrochureProyectoINAP.pdf>
- Morales, P. (2007). *Estadística inferencial: el error típico de la media (Estadística aplicada a ciencias sociales)*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas. Recuperado de <http://www.upcomillas.es/personal/peter/estadisticabasica/ErrorTipico.pdf>
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), (1994). *Manual de prácticas hidrológicas*. s.l.: autor.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), (2009). *Tercera Conferencia Mundial sobre el Clima*. Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), (2010, noviembre). *Guía de las red de las estaciones de observación GCOS-144*. Recuperado de http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/GCOS-144_es.pdf
- Pabón, J. D. y Torres, G. (2007). Impacto socioeconómico de los fenómenos de La Niña y El Niño en la sabana de Bogotá durante siglo XX. *Cuadernos de Geografía* (16).

Recuperado de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/viewFile/10161/10687>

- Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), (2005, 15 de septiembre). *Evaluación de los ecosistemas del milenio*. Recuperado de <http://www.pnuma.org/forodeministros/15-venezuela/ven09tre-EvaluaciondelosEcosistemasdelMilenio.pdf>
- Poveda, G. (1996). *Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Quereda, J. y Montón, E. (1994). *¿Hacia un cambio climático?* Castelló de la Plana: Universidad Jaume I.
- Revista Virtual El País* (2009). Posible racionamiento energético por sequías. Recuperado de <http://www.elpais.com.co/paionline/notas/Octubre052009/energiaracionar.html>
- Rozhdestvenskiy, A. V. y Chebotariov, A. I. (1974). *Métodos estadísticos en hidrología*. Leningrado: Hidrometeiozdat.
- Tahl, S. K. (1998). Time-frequency variability of ENSO and stochastic simulations. *Journal of Climate*, 2258-2272.
- Vásquez, M. (1998). *La historia del sol y el cambio climático*. México: McGraw-Hill.